第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析

赵蒙恩[1,2], 闫庆武[1,3], 刘政婷[1,2], 王文铭[1,2], 李桂娥[1,3], 吴振华[1,3]

（1. 中国矿业大学资源枯竭矿区土地修复与生态演替教育部野外科学观测研究站,江苏 徐州 221116；
2. 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221116；3. 中国矿业大学公共管理学院,江苏 徐州 221116）

摘 要：精确评估鄂尔多斯市土壤侵蚀时空变化并研究其影响因子,为该区域生态环境治理与矿区的水土保持提供参考。本文运用RUSLE模型和地理探测器方法,研究2000—2019年鄂尔多斯市土壤水力侵蚀状况,并分析其影响因子。结果表明:（1）鄂尔多斯市2000年,2005年,2010年,2015年以及2019年的平均土壤侵蚀量分别为3865.49 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,2932.85 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,2890.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,3711.10 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,4308.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,在研究的20 a间平均土壤侵蚀量先减后增,采矿活动的增加是土壤侵蚀加重的主要原因。（2）煤矿区20 km缓冲区内的土壤侵蚀情况向好的方向发展,矿区的生态治理措施有效且可行。（3）坡度对鄂尔多斯市土壤侵蚀的解释力最强,被认定为主导因子,因子间的协同作用对土壤侵蚀的解释力有所增强。鄂尔多斯市土壤侵蚀情况以微度和轻度侵蚀为主,>35°坡度区间、0~0.3植被覆盖度区间和工矿用地是易发生土壤侵蚀的区域。因此,适当增加植被覆盖可以有效地防治水土流失。

关键词：土壤侵蚀；RUSLE模型；地理探测器；煤矿区；影响因子；鄂尔多斯市

土壤侵蚀的危害在于破坏土壤资源、影响土壤肥力、加剧洪涝灾害、影响全球碳循环等[1],对人类的生存与生态的可持续发展产生了较大威胁,已经成为制约当今世界资源和环境的重点问题之一[2],据联合国粮食及农业组织(FAO)的数据显示,由于人类活动对土壤侵蚀的加剧作用,世界已经失去了约30%的耕地。我国的土壤侵蚀情况较为严峻,根据水利部最新发布的《2020年中国水土保持公报》显示,2020年我国共有269.27×10^4 km^2土地存在土壤侵蚀现象,约占我国陆地面积的28.05%。我国西部地区土壤侵蚀情况相对较为严重,侵蚀面积达到全国发生轻度以上侵蚀的60%以上。因此,定量研究土壤侵蚀的空间分布与时间演变特征,分析其驱动机制及影响因子对制定相关的防治措施与政策具有重要的参考价值,对于区域可持续发展以及生态安全具有重要意义。

对比传统的实地观测获得土壤侵蚀评价数据,遥感与地理信息系统相结合建立土壤侵蚀模型的方法更加具有适用性和科学性,由于参数获取方便与结构简单,目前修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation,RUSLE)在土壤侵蚀方面应用广泛。近年来,国内外学者基于该模型对土壤侵蚀的研究主要分为以下两个方面。首先是土壤侵蚀时空变化特征研究与预测。例如,张素等[3]基于RUSLE模型分析了凉山州孙水河流域不同土地利用类型、海拔和坡度条件下土壤侵蚀强度的特征,定量评价了研究区土壤侵蚀空间特征;Islam等[4]结合RS、GIS与RUSLE模型评价马来西亚冷岳河流域的潜在土壤侵蚀,研究结果表明:冷岳河流域约95%的区域被划分为极低至低侵蚀脆弱性等级;Melese等[5]利用Landsat影像和野外实测数据,综合评估了过去31 a土地利用变化对塔古流域土壤侵蚀的影响,结果表明裸地和农田比其他土地利用类型更易发生土壤侵蚀,塔古流域土地利用/覆被变化对土壤侵蚀影响显著;Alitane等[6]利用RUSLE模型和水土评估工具(SWAT)模型,对摩洛

收稿日期：2022-05-04； **修订日期：**2022-08-24
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021ZDPY0205);内蒙古自治区科技计划项目(2060399-273);国家自然科学基金项目(51874306)
作者简介：赵蒙恩(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向为自然地理环境演变. E-mail: 1427277041@qq.com
通讯作者：闫庆武. E-mail: 3403175@163.com

哥R'Dom流域基线期(2000—2013年)和未来期(2014—2027年)的土壤侵蚀速率进行了较为精确的量化和预测。其次,结合土壤侵蚀结果进行驱动因素研究及风险分析能够明确治理方向。例如贾磊等[7]利用地理探测器的方法,探究了渭河流域土壤侵蚀的驱动因素,指出了植被覆盖度、造林面积和降水量是影响流域土壤侵蚀空间分布的主要因素;田义超等[8]基于RUSLE模型并利用叠加分析与区域统计的方法,探究了广西北部湾钦江流域海拔、坡度、地貌等与土壤侵蚀的关系,对需要重点防治土壤侵蚀的区域提出了针对性的水土保持建议;Mhaske等[9]基于GIS利用RUSLE模型和层次分析法研究了印度贾坎德邦萨兰德森林的土壤侵蚀,结果表明占地不到1%的山顶矿区有着极高的土壤侵蚀风险,并提出了相关的治理建议。

鄂尔多斯市作为内蒙古重要的能源城市[10],处于中西部的衔接地带及农牧交错带[11],承担着生态屏障的作用,定量分析土壤侵蚀的分布与演变,对于科学开展生态修复工程有着积极意义。因此,利用RUSLE模型与GIS相结合,研究鄂尔多斯市2000—2019年间土壤水力侵蚀状况时空变化,利用地理探测器探究其影响因子,为该区域生态环境治理与矿区的水土保持提供科学依据。

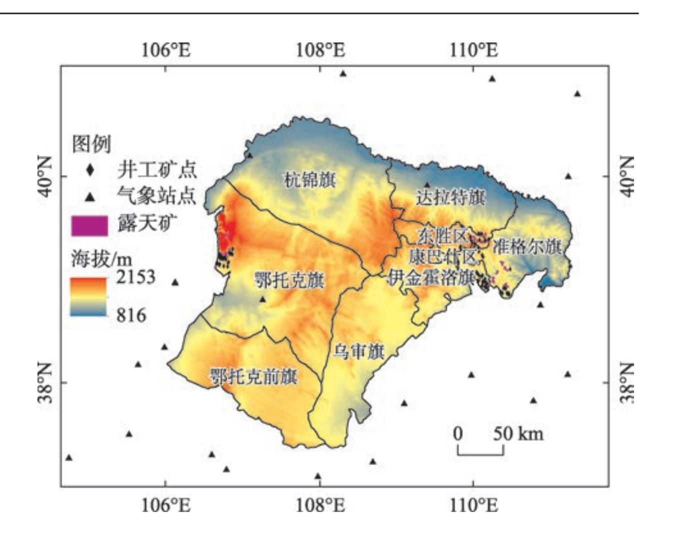
1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

选取地处干旱半干旱地区的鄂尔多斯市为研究区域,地理位置与概况见图1。鄂尔多斯市地势东高西低、起伏不平,地貌类型复杂多样,黄土丘陵沟壑、沙漠、沙地、平原兼而有之,东、北、西三面被黄河环绕,平均海拔1000~1500 m,气候类型为温带半干旱大陆性气候,年均气温6.2 ℃左右,年均降水量低于400 mm。研究区属典型的荒漠草原,主要以栗钙土、棕钙土、灰钙土及灰漠土为主,土壤质地松散,易风化易受雨水冲刷剥蚀,植被主要以旱生植物为主,覆盖率较低。鄂尔多斯市有各类矿藏50多种,煤炭、天然气和稀土储量丰富,是重要的煤化工基地,也是国家生态保护和治理的重要基地[12]。

1.2 数据来源及处理

研究选用的Landsat数据来自地理数据云(http://www.gscloud.cn/),MODIS数据来自美国国家航空



注:底图采用内蒙古自治区自然资源厅标准地图制作,审图号为蒙S(2017)029号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Study area

航天局官网(https://ladsweb.nascom.nasa.gov),气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn),DEM数据来自ASTER GDEM 2013年数据(http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/),地貌类型数据来自国家青藏高原科学数据中心(http://www.tpdc.ac.cn),土壤数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),矢量数据由天地图提供,矿区边界经实地调研获得,矿点数据由土地利用分类数据结合实地调研所得,在鄂尔多斯市选取了103个井工矿点和76个露天矿面进行矿区的土壤侵蚀研究,主要包括神东矿区和棋盘井矿区。所用数据均转换为CSCS_2000坐标系,栅格数据分辨率重采样为30 m×30 m。数据源及参数见表1。

2 研究方法

2.1 RUSLE模型

采用RUSLE模型进行鄂尔多斯市土壤侵蚀量的估算,并根据研究区以及数据的特点确定各因子的算法。RUSLE模型公式如下:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

式中:A为年土壤侵蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$),结果乘以100换算单位为$t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$;$R$为降水侵蚀力因子;$K$为土壤可蚀性因子;$L$为坡长因子;$S$为坡度因子;$C$为植被覆盖与管理因子;$P$为水土保持措施因子[13]。

降水冲刷地表造成表层土壤流失,从而引起土壤侵蚀。选用章文波等[14]提出的精度较高的以日

表1 数据来源及参数

Tab. 1 Data sources and parameters

数据类型	数据获取及处理
Landsat数据	解译分类后的数据精度kappa≥0.8 土地利用类型包括:耕地、水域、植被(主要为草地)、城镇用地、工矿用地及其他用地
MODIS数据	植物生长季(6—9月)MOD13Q1数据计算植被覆盖度
气象数据	2000—2019年54个气象站点的日降水数据,插值方法为普通克里金
DEM数据	分辨率为30 m,提取坡度、坡向
土壤数据	砂粒、粉粒和黏粒(以百分比显示)

降水量计算年均侵蚀力的估算方法计算降水侵蚀力因子R,计算公式为:

$$M_i = \alpha_5 \sum_{j=1}^{N} \left(D_j\right)^{\beta_5} \quad (2)$$

式中:M_i为第i个半月时段的侵蚀力值;N为该半月时段内的天数;D_j为半月时段内第j天的日降水量,要求日降水量≥12 mm,否则以0计算;α、β为参数[14],计算公式为:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中:P_{d12}为日降水量≥12 mm的日均降水量;P_{y12}为日降水量≥12 mm的年均降水量[14]。

自然状态下,土壤抵抗外力使其不被带走的能力通常用K值来衡量[15]。选用适用性较强的EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator)模型[16]估算K值,计算公式为:

$$K_{EPIC} = \left\{0.2 + 0.3e^{\left[-0.0256S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]}\right\} \times \left(\frac{S_i}{C_i + S_i}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.72-2.95C)}}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7}{S_n + e^{(-5.51+22.9S_n)}}\right] \quad (5)$$

式中:S_a为砂粒含量(%);S_i为粉粒含量(%);C_i为黏粒含量(%);C为有机碳含量(%);S_n=1−S_a/100。

对K_{EPIC}进行修订转化为适用于我国的土壤可蚀性估算[17]。修订公式为:

$$K = 0.1317K_{EPIC} \quad (6)$$

坡长和坡度因子反映了区域地势起伏及地形地貌特征对土壤侵蚀的影响[18]。选用具有普适性的Renard等[19-21]建立的方法计算坡长因子L及坡度因子S,计算公式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (7)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.0896) \Big/ \left[3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56\right] \quad (8)$$

$$m = \beta/(1+\beta) \quad (9)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03, & \theta < 5.1428° \\ 16.8\sin\theta - 0.5, & 5.1428° \leqslant \theta < 14.0362° \\ 21.91\sin\theta - 0.96, & \theta \geqslant 14.0362° \end{cases} \quad (10)$$

式中:λ为坡长;m为坡长指数;θ为坡度。

通过增加植被覆盖度与管理耕种方式能够在一定程度上抑制土壤侵蚀[22]。选用蔡崇法等[23]的方法估算C值,计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant f \leqslant 0.1\% \\ 0.6508 - 0.3436\lg f, & 0.1\% \leqslant f \leqslant 78.3\% \\ 0, & f \geqslant 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (12)$$

式中:f为植被覆盖度;$NDVI_{soil}$、$NDVI_{veg}$定义为裸土和植被完全覆盖情况下的NDVI值。

水土保持措施因子P是土壤侵蚀的抑制因子,通过采取特定的耕作方式或改变小地形、拦蓄地表径流、增加降水下渗,充分利用光热资源改善农牧产条件等措施,达到保持水土及土壤肥力、提高农业生产、减少土壤侵蚀的目的。鄂尔多斯市的耕地主要为旱地和部分水浇地,草地主要为天然牧草地及部分人工牧草地,根据鄂尔多斯市的土地利用现状,参照坡度信息及结合前人的研究成果[24-26],确定修正后的P因子值(表2与表3)。

2.2 地理探测器

采用王劲峰等[27]提出的地理探测器模型进行鄂尔多斯市土壤侵蚀影响因子分析。地理探测器是探测空间异质性的工具,选用因子探测、交互作用探测以及风险探测模块来识别鄂尔多斯市土壤侵蚀的影响因子以及解释影响因子对土壤侵蚀的交互作用和显著差异,以期为干旱半干旱地区的生态治理提供参考。

表2 土地利用类型*P*值

Tab. 2 Land use type *P* value

土地利用类型	水系	草地	城镇用地	工矿用地	其他用地
*P*值	0.0	0.8	0.1	1.0	1.0

表3 坡耕地坡度与*P*值换算关系

Tab. 3 Conversion relationship between slope and *P* value of sloping land

坡度/%	1~2	3~5	6~8	9~12	13~16	17~20	>20
*P*值	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0

因子探测器可用于探测因子X对属性Y的解释程度,用q值表示($0 \le q \le 1$),q值越大说明自变量对因变量的作用越明显,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \quad (13)$$

$$\mathrm{SSW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2,\ \mathrm{SST} = N\sigma^2 \quad (14)$$

式中:$h=1,\cdots,L$为属性Y或因子X的分层或分区;N_h和N分别为层h和全区的单元数;σ_h^2和σ^2分别是层h和全区的Y值的方差;SSW为层内方差之和;SST为全区总方差。

交互探测器是地理探测器的优势所在,用于识别双影响因子对Y的交互影响,其交互方式见表4。

风险探测器用于识别2个子区域间的属性均值是否存在显著差异,通过计算比较各个影响因子在不同类别分区下的土壤侵蚀量均值来识别土壤侵蚀高风险区域[28]。

表4 双影响因子的交互作用

Tab. 4 Interaction of two impact factors

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \mathrm{Min}[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\mathrm{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

选取土壤侵蚀量作为因变量,植被覆盖度、年均降水量、坡度、土地利用类型和距矿区距离作为土壤侵蚀的影响因子,识别鄂尔多斯市土壤侵蚀的主导因子。根据地理探测器的要求对连续型数据进行离散化。其中,土地利用数据根据类别进行分类,植被覆盖度数据分为8类(<0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.7、0.7~0.8、0.8~0.9、0.9~1),年均降水量数据按照等间距法分成9类,坡度数据分为8类(<5°、5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~30°、30°~35°、>35°),距矿区距离按照自然断点法分为15类。将鄂尔多斯市划分为2 km×2 km的研究单元,并设置每个研究单元的中心点为样本点,赋予上述各类属性值作为地理探测器的运行数据。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空特征分析

3.1.1 土壤侵蚀时空分布特征 根据SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》[29],应用ArcGIS 10.5的空间分析功能,按照RUSLE模型计算得到研究区2000年、2005年、2010年、2015年和2019年土壤侵蚀情况,将土壤侵蚀计算结果分为6级(微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀),得到鄂尔多斯市土壤侵蚀强度分级图(图2)。该地区土壤侵蚀强度空间分布规律与周平等[25]的研究相似,时间变化规律与刘英等[30]的研究基本吻合,证明研究结果可靠且RUSLE模型在研究区具有较好的适用性。

从平均土壤侵蚀量来看,20 a来鄂尔多斯市的土壤侵蚀情况发生了明显的变化,研究期的前10 a平均土壤侵蚀量呈下降趋势,从2000年的3865.49 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$降至2005年的2932.85 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$再降为2010年的2890.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。随着经济快速发展所引起的采矿活动增加,2015年的平均土壤侵蚀量增至3711.10 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,2019年平均土壤侵蚀量增至20 a以来的最大值4308.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。总体来看,鄂尔多斯市2000—2019年间的平均土壤侵蚀量呈先降低后增加的趋势。鄂尔多斯市各类侵蚀区的面积占比见表5。

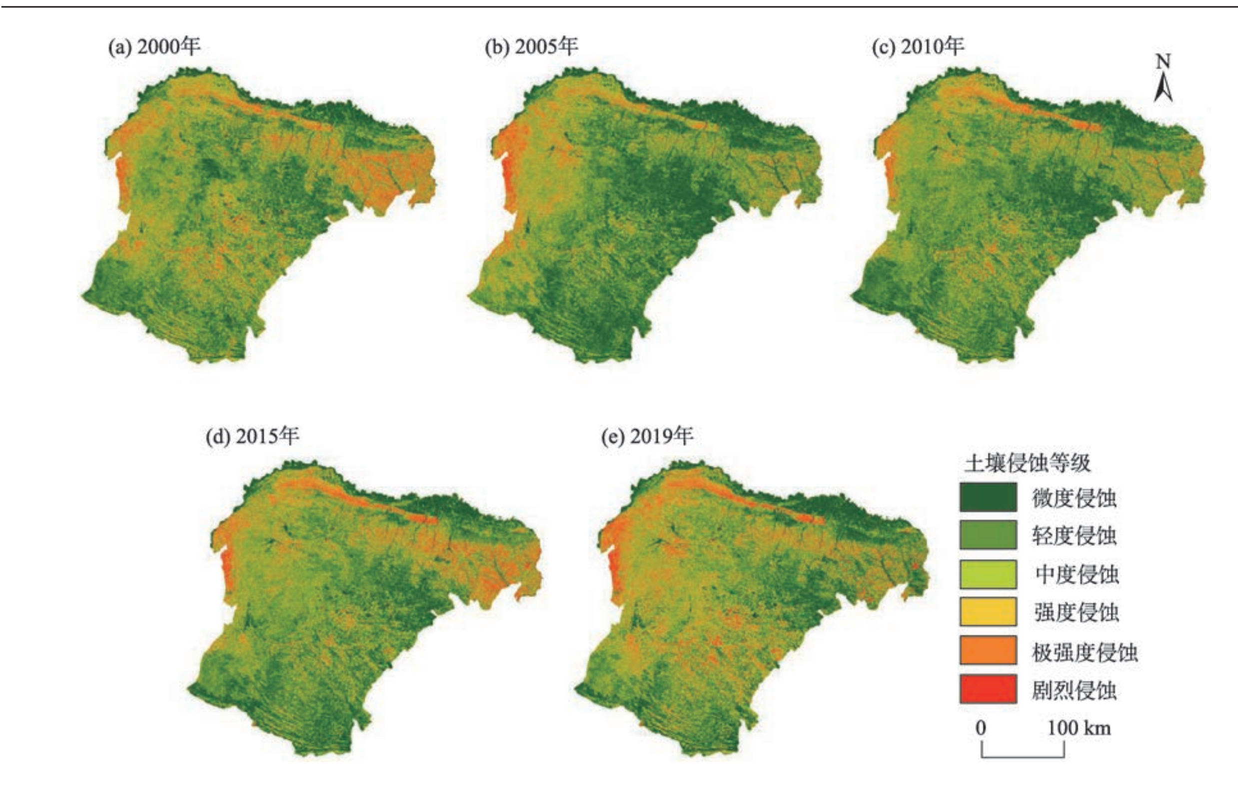


图2 2000—2019年鄂尔多斯市土壤侵蚀等级分布

Fig. 2 Grade distribution of soil erosion in Ordos City from 2000 to 2019

表5 不同土壤侵蚀等级面积

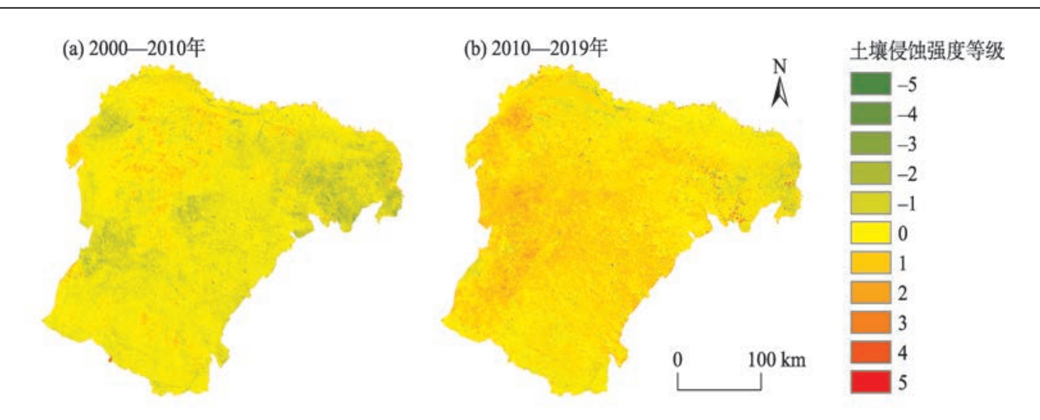
Tab. 5 Area of different soil erosion grades

侵蚀等级	面积/km²					比例/%				
	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
微度	22839.56	33191.72	29709.93	24713.01	22828.82	26.26	38.16	34.16	28.41	26.25
轻度	25270.39	24532.83	27151.54	25847.95	22378.47	29.06	28.21	31.22	29.72	25.73
中度	19073.19	15530.29	16791.69	18171.16	19312.13	21.93	17.86	19.31	20.89	22.20
强度	9276.38	6907.29	6985.41	8558.72	10216.18	10.67	7.94	8.03	9.84	11.75
极强度	7031.62	4744.24	4537.77	6309.29	8072.58	8.08	5.45	5.22	7.25	9.28
剧烈	3482.65	2067.40	1797.13	3373.29	4165.18	4.00	2.38	2.07	3.88	4.79

由图2和表5可以看出,鄂尔多斯市土壤侵蚀程度以微度和轻度为主,剧烈侵蚀主要集中于准格尔旗和鄂托克旗的西北部;强度侵蚀和极强度侵蚀零星分布在鄂托克旗的南部、杭锦旗的北部、达拉特旗的北部、东胜区的东部、乌审旗中部以及准格尔旗的部分地区,鄂尔多斯市大面积区域属于中度以下侵蚀。20 a间,鄂尔多斯市土壤侵蚀状况变化显著,2000—2010年,微度、轻度侵蚀区域面积均有所增加,极强度和剧烈侵蚀区域面积逐年减少,这表明鄂尔多斯市在这10 a中水土保持效果较好。2010—2019年与前10 a的情况相反,土壤侵蚀情况加剧,主要原因可能是煤炭开采强度的加大。

3.1.2 土壤侵蚀时空变化特征 根据RUSLE模型得出5期土壤侵蚀情况,进一步分析近20 a来鄂尔多斯市土壤侵蚀时空变化特征,将5期数据分为2个时段2000—2010年和2010—2019年,应用ArcGIS 10.5的空间分析功能,得到鄂尔多斯市土壤侵蚀强度变化(图3)。

2000—2010年鄂尔多斯市有57.22%的区域土壤侵蚀强度等级未发生改变,34.77%的区域土壤侵蚀强度等级有所下降,主要分布于准格尔旗、鄂托克旗的西南部以及杭锦旗的西部地区,综合分析发现,土壤侵蚀强度等级没有升高的区域大多位于海拔较低的平坦地区,说明水土保持措施较好,土壤



注：负数代表土壤侵蚀强度等级下降，正数代表土壤侵蚀强度等级升高，绝对值越大代表侵蚀强度等级变化越大。

图3 鄂尔多斯市各时段土壤侵蚀强度等级变化

Fig. 3 Changes of soil erosion intensity of Ordos City in different periods

侵蚀情况有所改善，全区域8.01%的地区土壤侵蚀强度等级升高，集中分布在鄂托克旗的北部和杭锦旗的中部。2010—2019年的土壤侵蚀强度变化与前10 a较为不同，等级不变与等级降低的区域分别占比49.00%和7.13%，土壤侵蚀强度等级上升的地区占比增至43.87%，主要分布于鄂尔多斯市的西部地区、中部地区以及零星分布于准格尔旗、东胜区和康巴什区，大体呈现出躺卧的"T"字分布，该区域大多地势较为陡峭，土壤容易被侵蚀，可以考虑适当增加该区域的水土保持设施建设。总体上，在研究的20 a间，鄂尔多斯市的土壤侵蚀情况在2000—2010年有所好转，2010—2019年土壤侵蚀情况加重。

3.2 土壤侵蚀异质性分析

3.2.1 土地利用类型 鄂尔多斯市土地利用类型主要由耕地、草地、城镇用地、工矿用地、其他用地和水域构成(图4)。由表6可以看出，鄂尔多斯市的土地利用类型中草地和其他用地所占比例最大，两者

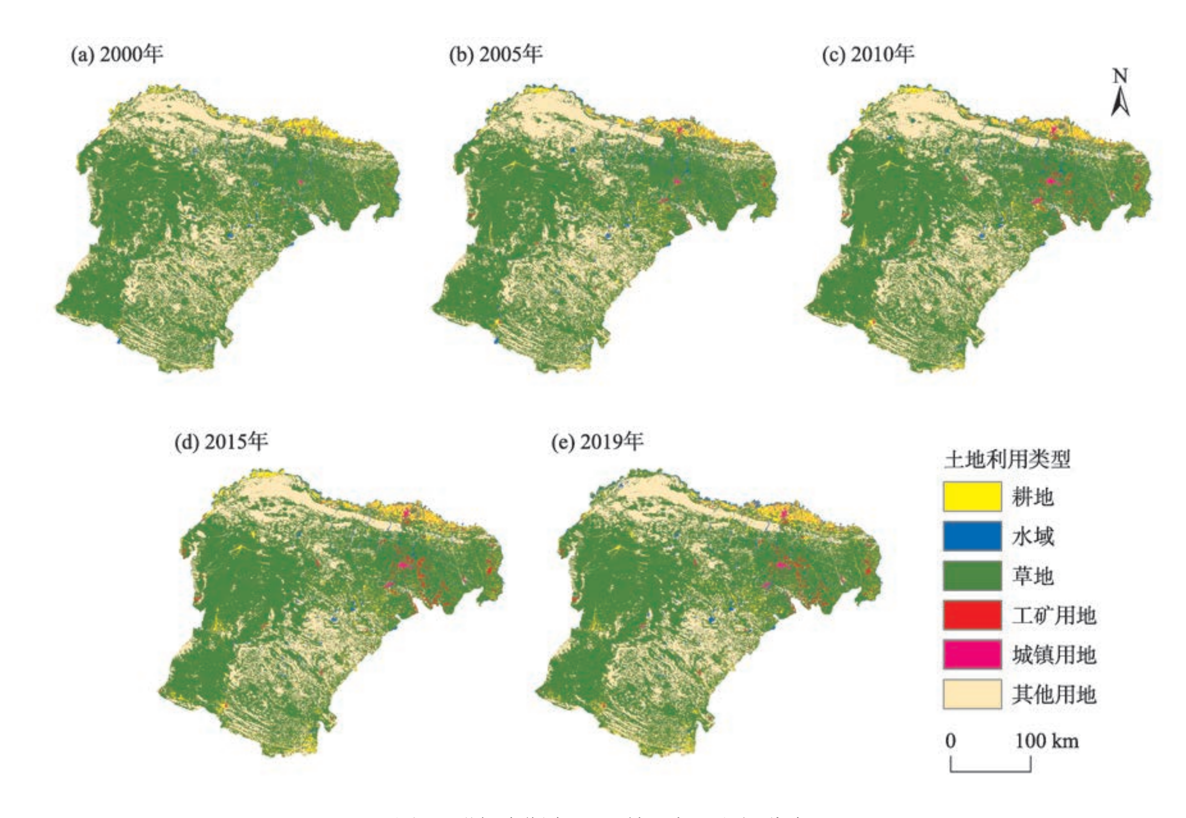


图4 鄂尔多斯市土地利用类型空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use types in Ordos City

表6　土地利用类型面积

Tab. 6　Land use type area　/%

	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
耕地	3.87	3.94	4.04	5.12	5.12
水域	1.24	1.48	1.34	1.24	1.52
工矿用地	0.04	0.15	0.55	0.95	0.84
城镇用地	0.26	0.44	0.56	0.61	0.65
草地	65.45	64.14	66.30	65.84	65.68
其他用地	29.14	29.85	27.22	26.24	26.20

之和约占整个区域面积的90%以上,其余土地利用类型所占比例较少。

分析2000—2019年的鄂尔多斯市土地利用类型变化,面积发生了较大的变化(除水域与草地的面积变动较小外),耕地、工矿用地、城镇用地的面积基本上逐年增加,其他用地的面积基本上呈现逐年较少的趋势。

结合2000年、2005年、2010年、2015年与2019年的土壤侵蚀量与土地利用数据,统计出每种土地利用类型的平均土壤侵蚀量。结果表明,不同土地利用类型间土壤侵蚀状况存在着较大差异,平均土壤侵蚀量工矿用地最大,城镇用地最小。如表7所示,对比之下,工矿用地与其他用地的土壤侵蚀较为严重。从不同类型的土地利用的平均侵蚀量可以看出,工矿用地和其他用地是鄂尔多斯市的主要侵蚀的土地利用类型,城镇用地和耕地是侵蚀情况较轻的土地利用类型,由此可见,增加人为干预可对地区土壤侵蚀产生较大影响;2010年区域侵蚀量大幅度降低主要得益于草地和耕地的增加以及其他用地的明显减少。经过20多年的综合治理,改变了区域土地利用格局,有效地减少了土壤侵蚀。

3.2.2　地形　坡度定义为地表斜面与水平面的夹角,反映了地表形态的倾斜程度,坡度大小与土壤侵蚀强弱密不可分。参考张珊珊等[31]的研究,将坡度划分为6个等级:0~5°、5°~8°、8°~15°、15°~25°、25°~35°和35°~90°(图5)。

由图6可以看出,随着坡度的增加,平均土壤侵蚀量呈现出明显的正相关,2010年土壤侵蚀情况最好,各坡度带下的平均土壤侵蚀量均为20 a间的最低。鄂尔多斯市坡度低于15°的区域占全市面积的90%以上,0~5°、5°~8°与8°~15°坡度带的土壤侵蚀情况与鄂尔多斯市土壤侵蚀情况相一致,20 a间呈现出先下降后上升的趋势,虽然陡坡地区所占比例不大,其土壤侵蚀情况仍需重视。

3.2.3　地貌类型　地貌反映地表形态,对人类的经济建设有重要影响。研究各地貌类型下的土壤侵蚀情况可以正确认识土壤侵蚀的差异性,对区域治理具有一定的指导性意义,鄂尔多斯市的地貌分布见图7,地貌类型复杂多样,多为堆积地貌与剥蚀地貌。

由表8可见,中起伏山地平均土壤侵蚀量最高,其次是剥蚀台地,该类地貌类型地势起伏较大,土壤易被剥蚀,黄土梁峁和丘陵地区的平均土壤侵蚀量处于第二梯队,2000年和2015年黄土梁峁这类地貌类型平均土壤侵蚀量异常升高,分析认为是雨季的滞后和短时间内的暴雨冲刷导致土壤侵蚀的加重,洪积平原和冲积平原平均土壤侵蚀量较低,冲击洪积平原大多处于准格尔旗附近的山谷之中,相

表7　各土地利用类型的平均土壤侵蚀量

Tab. 7　Average soil erosion of different land use types　/($t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$)

	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
耕地	924.72	474.56	616.79	803.35	501.95
工矿用地	6549.87	5838.23	7000.92	8977.01	14450.75
城镇用地	272.35	161.57	264.02	324.55	302.48
草地	3505.69	2824.72	2437.27	3443.18	3775.18
其他用地	5244.54	3655.50	5615.15	5001.56	6397.47

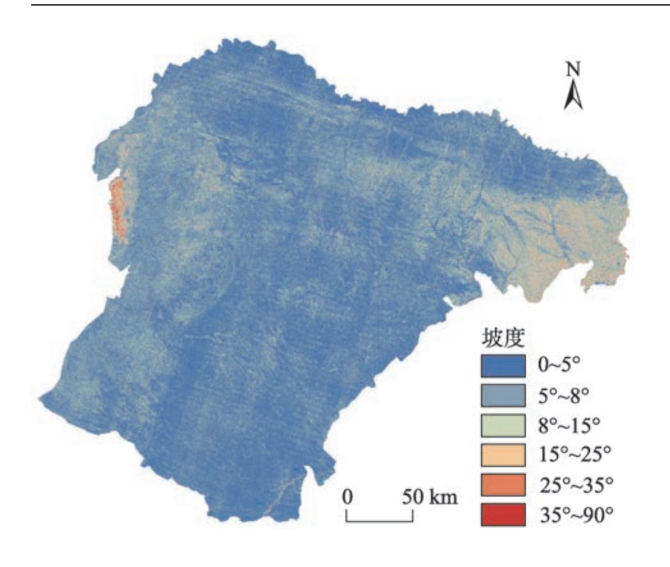


图5 鄂尔多斯市坡度分带

Fig. 5 Slope zoning of Ordos City

较于黄河沿岸的平原地区,该平原土壤侵蚀情况较重,可能原因为矿区多位于这类型地区,土壤侵蚀情况比较突出,风积地貌分布的面积最大,库布其、毛乌素沙地分布其中,土壤侵蚀情况较轻,这表明鄂尔多斯市所实施的退耕还林、植树造林等多项生态举措成效较为显著。

3.2.4 *煤矿区* 整合露天矿面与井工矿点数据,生成20 km缓冲区,分区统计缓冲区内的平均土壤侵蚀量。整体而言,鄂尔多斯市矿区的土壤侵蚀状况整体呈现好转趋势,从2000年7029.68 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$的平均土壤侵蚀量逐年下降,2005年下降为4019.75 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,2010年降至20 a间的最小值3611.05 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,而后2015年土壤侵蚀状况有所加剧,平均土壤侵蚀量升至6804.99 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,2019年降至4931.30 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。

综上所述,造成2010—2015年平均土壤侵蚀量增加的原因为:(1) 2015年滞后2个月的雨季,造成矿区内植被覆盖度降低,土壤侵蚀情况加重;(2) 矿区面积增加造成区域自然条件退化,表层土壤易被剥蚀加重土壤侵蚀。总体上看,鄂尔多斯市矿区的土壤侵蚀情况向好的方向发展,说明矿区对生态恢复重视程度较高,通过恢复植被、熟化土壤、实现土地再利用等矿区复垦技术和微生物复垦技术,在水土保持方面取得了较为积极的效果。

3.3 土壤侵蚀影响因子分析

由表9可知,选用的影响因子对土壤侵蚀的解释程度差异显著。从鄂尔多斯全市来看,各影响因子对土壤侵蚀量的解释力从大到小的排序为:坡度>植被覆盖度>土地利用类型>年均降水量>距矿区距离。其中,解释力最强的影响因子为坡度,q值达到0.2131,表明在选用的影响因子中,坡度是决定土壤侵蚀状况的主导因子;排在第二位的是植被覆盖度,解释力为0.1145;距矿区距离因子的q值最小,表明该因子对土壤侵蚀的影响程度最低。通过分析发现,鄂尔多斯市矿区多为井工矿,对比与露天开采,井工采矿的方式对地表环境破坏弱,尤其是对土壤的扰动有较大程度的降低,另外,由于鄂尔多斯市对矿区生态恢复与治理的重视,矿区周边的植被恢复情况效果显著,这也是距矿区距离该影响因子对土壤侵蚀量解释力较低的原因之一。对比自然环境因子土地利用类型、植被覆盖度、年均降水量与坡度和人为因子距矿区距离的解释力可以发现,坡度与植被覆盖度的解释力远大于距矿区距离的解释力,这表明自然环境因子是影响鄂尔多斯

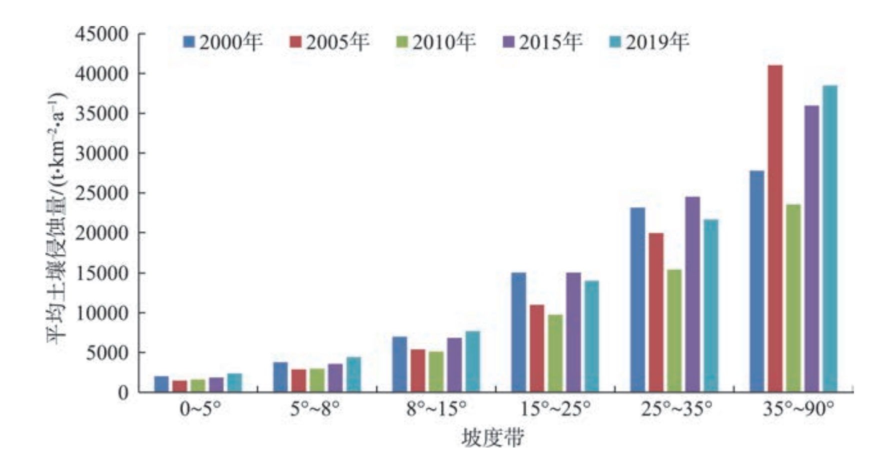


图6 鄂尔多斯市各坡度带平均土壤侵蚀量

Fig. 6 The average amount of soil erosion in each slope zone in Ordos City

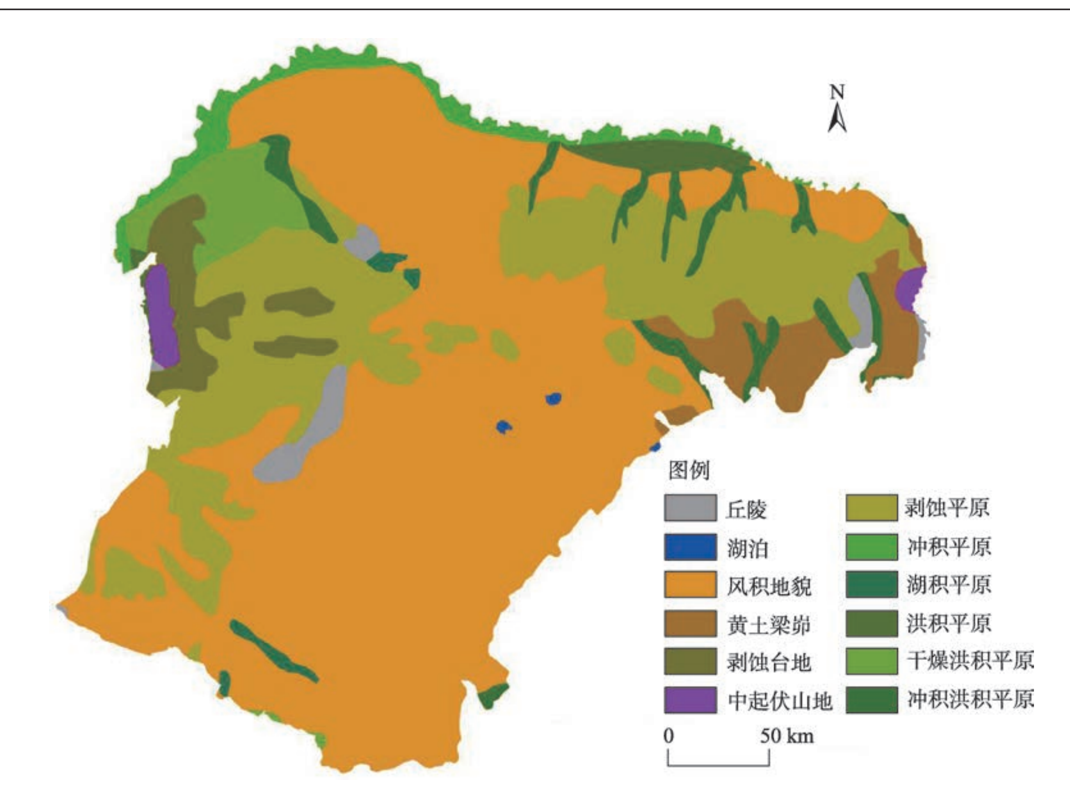


图7　鄂尔多斯市地貌类型

Fig. 7　Landform type of Ordos City

表8　各地貌类型的平均土壤侵蚀量

Tab. 8　Average soil erosion of different landform type　$/(t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1})$

	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
中起伏山地	10714.33	15044.19	8821.27	13159.85	15159.90
剥蚀台地	4851.99	7887.17	4077.70	5603.21	7884.93
干燥洪积平原	5619.93	6823.66	4345.24	5421.02	7475.73
黄土梁峁	7477.71	3216.24	3589.22	7035.75	4663.14
剥蚀平原	4430.40	3474.53	2971.53	4530.06	4608.90
丘陵	4155.03	3160.80	2994.71	4474.03	4462.66
冲积洪积平原	4763.53	2782.47	3183.56	4875.86	4004.45
湖积平原	2777.36	1903.60	2823.42	3156.54	3939.80
风积地貌	3219.93	2079.13	2637.73	2849.38	3773.89
冲积平原	1966.72	2089.69	1735.16	1904.83	2418.63
洪积平原	1831.32	2283.16	1593.97	1925.75	2354.03

表9　影响因子解释力

Tab. 9　Explanatory power of impact factor

影响因子	土地利用类型	植被覆盖度	年均降水量	坡度	距矿区距离
q值	0.0753	0.1145	0.0338	0.2131	0.0119

市土壤侵蚀空间分布的主要原因。

由表10可见,双因子的交互作用增强了对鄂尔多斯市土壤侵蚀空间分布的解释力。坡度与各因子的交互作用q值明显高于其他因子间的交互作用q值,是土壤侵蚀的显著影响因子,这表明地形与土壤侵蚀空间分布之间有较大的关联性,坡度相差较

表10 双因子交互作用下的解释力

Tab. 10 Explanatory power under the interaction of two factors

影响因子	土地利用类型	植被覆盖度	降水	坡度	距矿区距离
土地利用类型	0.0753	0.1725	0.1129	0.3830	0.1124
植被覆盖度	0.1725	0.1145	0.1383	0.4019	0.1436
降水	0.1129	0.1383	0.0338	0.2825	0.0795
坡度	0.3830	0.4019	0.2825	0.2131	0.2532
距矿区距离	0.1124	0.1436	0.0795	0.2532	0.0119

表11 土壤侵蚀高风险区域及平均侵蚀量

Tab. 11 Soil erosion high risk area and average amount of erosion

影响因子	降水/mm	坡度	植被覆盖度	土地利用类型	距离/m
高风险区	141.02~174.62	>35°	<0.3	工矿用地	0~13528
平均侵蚀量/($t·km^{-2}·a^{-1}$)	7882.84	40530.58	6496.18	14450.75	5865.62

大的区域土壤侵蚀情况差距也较为明显。表9中交互作用解释力排在首位的是坡度与植被覆盖度，解释力达到了0.4019，这表明鄂尔多斯市应当重视坡度较大地区的植被覆盖情况，提高地势起伏较大地区的植被覆盖度。

根据表11可知，统计各影响因子重分类后各类别的平均土壤侵蚀量，识别土壤侵蚀高风险区，可为鄂尔多斯市水土保持提供方向。结果表明：坡度>35°的地区极易发生水土流失；土地利用类型中工矿用地的平均土壤侵蚀量较高；年均降水量介于141.02~174.62 mm间的地区发生水土流失的可能性较高；植被覆盖度<0.3的地区水土保持性差；距矿区距离为0~13528 m的地区发生水土流失风险较高。基于此，鄂尔多斯市的生态环境修复与治理的重点应该定位于陡坡地区、植被覆盖度低的区域与工矿用地。

4 讨 论

本研究基于较长时间序列对鄂尔多斯市土壤侵蚀的空间分布与影响因子进行分析，经过对比发现，基于RUSLE模型对于研究区的土壤侵蚀估算具有可行性。基于地理探测器与土壤侵蚀异质性的分析结果，提出以下建议：将鄂尔多斯市分为西部山地地区、东部黄土地区、中部南部沙地地区和矿区土壤敏感区进行分区治理。西部山地地区地势起伏大，陡坡较多，此地区优先采取陡坡治理、恢复植被、升级淤地坝拦泥蓄水工程的措施，东部黄土地区适当实施退耕还林、封山育林等造林工程，中部南部沙地地区增强全民环保意识，将植树造林、种树种草作为实践活动宣传于学校和社区，对于矿区土壤敏感区增加周边地区植被覆盖度，废弃矿场进行生态修复治理，政府加强预防监督职能，依法对地区的土壤侵蚀情况进行管理。

然而，研究在以下2个方面存在不足：水土保持因子的赋值是基于经过监督分类与目视解译的30 m分辨率的Landsat影像，由于植物生长季的影像有限，不可避免的会有云层遮挡等问题，影响土壤侵蚀的精度，下一步的研究中考虑使用更高时间分辨率与空间分辨率的影像并结合实地调研数据进行土地利用类型的分类；影响鄂尔多斯市土壤侵蚀的原因很多，由于数据获取有限，在地理探测器的输入数据中对于土壤侵蚀的人为影响因子选取不足，在今后的研究中可考虑更加全面地分析各方面因子对土壤侵蚀的影响，以期获得更加精确的影响因子评定，为水土保持生态治理提供更加科学的建议，为改善人地关系和促进区域可持续发展提供更加科学的参考依据。

5 结 论

通过对鄂尔多斯市2000—2019年土壤侵蚀量进行估算与影响因子的分析得出以下结论：

（1）鄂尔多斯市土壤侵蚀以微度、轻度侵蚀为主，较强程度的侵蚀主要集中于准格尔旗和鄂托克旗的西北部。2000—2019年平均土壤侵蚀量呈先

减后增状态,2000—2010年水土保持效果较好,2010—2019年由于经济发展带来的矿区面积增加使得土壤侵蚀情况有所加重。

(2)就土地利用类型来看,工矿用地和其他用地是鄂尔多斯市的主要侵蚀土地利用类型;就地形而言,平均土壤侵蚀量随着坡度的增大呈现出明显的正相关,陡坡侵蚀是该区域水土保持工作中需要特别注意的部分;地势起伏大的地貌类型平均土壤侵蚀量较高,鄂尔多斯市对风积地貌的治理成效显著。通过对矿区的数据整合与缓冲区分析,统计得到矿区20 km缓冲区内的平均土壤侵蚀量,结果表明,矿区土壤侵蚀20 a以来向好的方向发展,表明矿区复垦与生态修复对于生态环境的恢复与治理起到了极大的作用。

(3)利用地理探测器对土壤侵蚀的各影响因子的分析表明,坡度的解释力最大,说明坡度是鄂尔多斯市土壤侵蚀的主导因子;坡度与植被覆盖度的交互作用解释力最大,表明应该加大对地势起伏较大区域的植被种植力度;35°~90°坡度区间、0~0.3植被覆盖度区间和工矿用地是易发生土壤侵蚀的区域,对这类高风险地区的水土保持应当尤为重视。

参考文献(References):

[1] 颜世敏, 马阔. 土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 江西农业, 2019(6): 67. [Yan Shimin, Ma Kuo. Analysis on influencing factors and hazards of soil erosion[J]. Jiangxi Agriculture, 2019(6): 67.]

[2] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于RUSLE模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 73−79. [Chen Chaoliang, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui Watershed based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 73−79.]

[3] 张素, 熊东红, 吴汉, 等. 基于RUSLE模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 24−30. [Zhang Su, Xiong Donghong, Wu Han, et al. Research on spatial variation of soil erosion in Sunshui River Basin based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 24−30.]

[4] Islam M R, Wan Z, Lai S H, et al. Development of an erosion model for Langat River Basin, Malaysia, adapting GIS and RS in RUSLE[J]. Applied Water Science, 2020, 10(7): 1−11.

[5] Melese T, Senamaw A, Belay T, et al. The spatiotemporal dynamics of land use land cover change, and its impact on soil erosion in Tagaw Watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. Global Challenges, 2021, 5(7): 1−13.

[6] Alitane A, Essahlaoui A, Hafyani M E, et al. Water erosion monitoring and prediction in response to the effects of climate change using RUSLE and SWAT equations: Case of R'Dom Watershed in Morocco[J]. Land, 2022, 11(1): 93.

[7] 贾磊, 姚顺波, 邓元杰, 等. 渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 305−314. [Ja Lei, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. Temporal and spatial characteristics of soil erosion risk in Weihe River Basin and its geographical exploration[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(3): 305−314.]

[8] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 257−273. [Tian Yichao, Huang Yuanlin, Zhang Qiang, et al. Soil erosion and selenium loss in Qinjiang River Basin in Beibu Gulf coastal zone[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 257−273.]

[9] Mhaske S N, Pathak K, Dash S S, et al. Assessment and management of soil erosion in the hilltop mining dominated catchment using GIS integrated RUSLE model[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294(11): 112987.

[10] 王慧子. 经济新常态下煤炭经济的发展问题及对策——以内蒙古为例[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(18): 51−52. [Wang Huizi. Development problems and countermeasures of coal economy under the new normal of economy: Taking Inner Mongolia as an example[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2020(18): 51−52.]

[11] 白壮壮, 崔建新, 丁晓辉. 1986—2015年鄂尔多斯高原沙漠化及其驱动因素研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 749−756. [Bai Zhuangzhuang, Cui Jianxin, Ding Xiaohui. Desertification and its driving factors in the Ordos Plateau, from 1986 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 749−756.]

[12] 陈佳锐, 叶子瑜, 张照熙, 等. 基于超效率BCC-DEA模型西部城市产业园国土空间利用绩效评价——以鄂尔多斯市为例[J]. 上海国土资源, 2021, 42(2): 44−48, 94. [Chen Jiarui, Ye Ziyu, Zhang Zhaoxi, et al. Performance evaluation of land and space utilization of industrial parks in western cities based on the super efficiency BCC-DEA model: A case study of Ordos City[J]. Shanghai Land & Resources, 2021, 42(2): 44−48, 94.]

[13] 陶鸿斌, 汪文飞. 基于GIS分析土壤侵蚀过程中氮磷流失分布——以定西市安定区为例[J]. 绿色科技, 2018(24): 15−17, 19. [Tao Hongbin, Wang Wenfei. Analysis of nitrogen and phosphorus losses in soil erosion process based on GIS: Taking Dingxi city Anding district as an example[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(24): 15−17, 19.]

[14] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降水侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35−41. [Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35−41.]

[15] 胡刚, 宋慧, 石星军, 等. 基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 610−617. [Hu Gang, Song Hui, Shi Xingjun, et al. Soil erosion characteristics based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed[J]. Scientia Geo-

graphica Sinica, 2018, 38(4): 610-617.]

[16] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1983, 38(5): 381-383.

[17] Foster G R, Mccool D K, Renard K G, et al. Conversion of the universal soil los equation to SI metric units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1981, 36(6): 355-359.

[18] 张园眼, 李天宏. 基于GIS和RUSLE模型的深圳市土壤侵蚀研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1189-1202. [Zhang Yuanyan, Li Tianhong. Soil erosion in Shenzhen city based on GIS and RUSLE model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1189-1202.]

[19] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington DC: United States Department of Agriculture, 1997: 143-182.

[20] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.

[21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.

[22] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150-159. [Chen Tongyao, Jia Yanfeng, Wang Jianan, et al. Current situation and function of soil conservation in national nature reserves in the Qilian Mountains based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 150-159.]

[23] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24. [Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Joumal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.]

[24] 尹璐. 扎赉诺尔矿区土地利用格局及其土地退化演变分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016. [Yin Lu. The Analysis of Land Use and Degradation Changes in Zhalainur Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.]

[25] 周平, 蒙吉军. 鄂尔多斯市1988—2000年土壤水力侵蚀与土地利用时空变化关系[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1706-1717. [Zhou Ping, Meng Jijun. The temporal and spatial variability relationship of soil water erosion and land use type in Ordos during the period of 1988-2000[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(10): 1706-1717.]

[26] 黄婷, 于德永, 乔建民, 等. 内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1256-1266. [Huang Ting, Yu Deyong, Qiao Jianmin, et al. Landscape pattern change and soil conservation in Xilingol League, Inner Mongolia [J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1256-1266.]

[27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[28] 邹雅婧, 闫庆武, 谭学玲, 等. 渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1387-1394. [Zou Yajing, Yan Qingwu, Tan Xueling, et al. Evaluation of soil erosion and driving factors analysis in Weibei mining area[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1387-1394.]

[29] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL190-2007)[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.]

[30] 刘英, 魏嘉莉, 岳辉, 等. 神东矿区土壤侵蚀时空特征及驱动力分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(1): 142-153. [Liu Ying, Wei Jiali, Yue Hui, et al. Analysis on temporal and spatial characteristics and driving factors of soil erosion in Shendong mining area[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(1): 142-153.]

[31] 张珊珊, 周忠发, 孙小涛, 等. 基于坡度等级的喀斯特山区石漠化与水土流失相关性研究——以贵州省盘县为例[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 79-86. [Zhang Shanshan, Zhou Zhongfa, Sun Xiaotao, et al. Based on the slope grade of rocky desertification and water and soil loss correlation study in Karst Mountain Area: A case in Panxian county, Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 79-86.]

Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City

ZHAO Mengen[1,2], YAN Qingwu[1,3], LIU Zhengting[1,2], WANG Wenming[1,2], LI Gui'e[1,3], WU Zhenhua[1,3]

(1. Observation and Research Station of Ministry of Education for Resource Exhausted Mining Area Land Restoration and Ecological Succession, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. School of Public Policy & Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The spatial-temporal variation and influencing factors of soil erosion in Ordos City were studied to provide a reference for ecological environment management and soil and water conservation in mining areas. Based on the RUSLE model and geographic detector method, hydraulic soil erosion in Ordos City from 2000 to 2019 was studied, and its influencing factors were analyzed in this paper. The results showed that: (1) The average soil erosion in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2019 was 3865.49 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, 2932.85 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, 2890.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, 3711.10 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, 4308.21 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, respectively. The average soil erosion decreased first and then increased during the 20 years. Increased mining activity was the main reason for the increased soil erosion. (2) The soil erosion in the 20 km buffer zone of the coal mine area developed in a good direction, and the ecological control measures in the mining area were effective and feasible. (3) Slope had the strongest explanatory power on soil erosion in Ordos City and was identified as the leading factor. The synergy of the two factors had enhanced the explanatory power for soil erosion. The soil erosion situation in Ordos City was mainly slight and mild erosion. >35° slope interval, 0−0.3 vegetation coverage interval, and industrial and mining land was an area prone to soil erosion. Therefore, increasing vegetation coverage can effectively prevent soil erosion.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; geographic detector; coal mining area; impact factor; Ordos City